



TITLE:

Dynamic Ferrite Transformation Behavior in 10Ni-0.1C Steel during Thermo-Mechanically Controlled Process(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Zhao, Lijia

CITATION:

Zhao, Lijia. Dynamic Ferrite Transformation Behavior in 10Ni-0.1C Steel during Thermo-Mechanically Controlled Process. 京都大学, 2015, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2015-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18987>

RIGHT:

許諾条件により本文は2020/03/01に公開; 許諾条件により要約は2016/03/01に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	趙 立佳
論文題目	Dynamic Ferrite Transformation Behavior in 10Ni-0.1C Steel during Thermo-Mechanically Controlled Process (10Ni-0.1C 鋼の加工熱処理中に生じる動的相変態に関する研究)		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、低炭素鋼における動的フェライト変態挙動を系統的に実験研究し、動的変態の進展（kinetics）に与える温度・ひずみ速度・ひずみといった変形条件の影響や、組織の形成過程を調査した研究成果を取りまとめたものであり、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景と目的を示している。構造用金属材料として最も重要な鉄鋼材料においては、塑性加工と熱処理を組み合わせた種々の加工熱処理プロセスによって、そのミクロ組織を制御し、優れた力学特性を得ることが実践されてきた。フェライト相が組織の主体となる溶接構造用低炭素厚鋼板においては、オーステナイト低温域での圧延によってオーステナイト相中に多数の格子欠陥を導入し、それらを核生成サイトとすることで微細フェライト組織の作り込みが行われている。近年は、より優れた機械的性質を得るために、オーステナイト熱間圧延の最終仕上げ温度を低下させる試みが数多く行われており、その過程で、A_3 変態点以下での低温オーステナイト圧延時のフェライト変態によって、粒径 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ の超微細粒フェライト（Ultra-Fine Ferrite: UFF）組織が得られることが報告されている。そしてしばしば、その場合のフェライト変態機構は、オーステナイトの変形中に生じる動的相変態（Dynamic Transformation）であるとの主張がなされている。そもそもそうした低温域では、オーステナイト相は本質的に不安定であり、塑性変形によってフェライト変態の kinetics は短時間側に促進される。著者が所属する研究室では、Fe-6wt%Ni-0.1wt%C 合金を用いた先行研究において、特定の温度・ひずみ速度条件下で動的フェライト変態が確かに生じることを確認し、得られるフェライトの特徴を明らかにした。一方、動的フェライト変態の進展（kinetics）に与える温度・ひずみ速度・ひずみといった変形条件の影響や、組織の形成過程の多くは未だ不明であった。特に、低温大ひずみ加工熱処理時にしばしば得られる等軸 UFF 組織の形成機構は全く明らかにされていない。こうした点は動的変態に関する基礎的理解を深めるための妨げとなるとともに、加工熱処理条件を制御して超微細粒フェライト鋼を実用的に得るための障害となっている。本研究は、こうした背景のもと、Fe-10wt%Ni-0.1wt%C 合金に対して系統的な加工熱処理実験を行い、加工熱処理時の応力-ひずみ応答や、得られるミクロ組織を詳細に調査することによって、上記の問題点の解決を試みている。</p> <p>第2章では、上記合金における動的フェライト変態の発現条件をまず明確にしている。二回微分法を用いて変形抵抗の軟化を解析することによって、動的フェライト変態の発現を精度よく検知できることを示している。その上で、加工熱処理条件が動的フェライト変態の kinetics とフェライト組織にどのような影響を与えるかを明らかにしている。変形温度の低下とオーステナイト粒の微細化により、動的フェライト変態の発現ひずみが減少するとともに、kinetics が大きく促進されることを見出している。また、ひずみ速度の増加は変態 kinetics を加速するが、ひずみ速度が小さいほど動的変態開始の臨界ひずみは減少し、同じ加工度でより大きな体積率のフェライト組織が得られること</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	趙 立佳
<p>を初めて見出している。得られるフェライト粒径と加工熱処理条件の関係を明確にし、その理由を核生成サイトの増加に基づき理解している。</p> <p>第3章では、動の変態と静的変態の類似点と相違点を調査している。同一の温度とひずみ量のもとでは、動のフェライト変態の kinetics は静的変態の場合よりも大きく促進される。また動の変態により生成するフェライトは、静的フェライトとは異なる形態を示すことを見出している。静的フェライトがオーステナイト母結晶の粒界から生じる微細等軸粒と粒内から生じる粗大等軸粒よりなる組織を示すのに対し、動のフェライトは等軸 UFF と伸長した粗大フェライト粒からなる組織を示す。動の変態の場合の等軸 UFF 組織の形成過程を詳細に調査した結果、UFF は動の相変態とは異なる機構で生じていると考察している。</p> <p>第4章では、等軸 UFF 組織の形成機構の解明を、種々の変形条件におけるフェライト組織の形成過程を丹念に調べることによって試みている。その結果、等軸 UFF は、動の変態によって生じたフェライトが、引き続き動の再結晶によって超微細化したものであると結論づけている。フェライト組織の温間圧縮試験を行って同合金におけるフェライトの動の再結晶挙動を明らかにし、動のフェライト変態の役割が、変態時の微細粒フェライトの形成と、強度の異なるフェライト+オーステナイト二相組織における軟質フェライト層への変形集中による動の再結晶 kinetics の促進にあることを見出している。また、動のフェライト変態と動の再結晶とでは、kinetics のひずみ速度依存性が正反対の傾向を示すことを初めて明らかにしている。</p> <p>第5章では、第4章の結果を受け、動の変態により形成されたフェライト粒のその後の動の再結晶現象に及ぼす変形温度と初期オーステナイト粒径の影響を調査している。初期オーステナイト粒径が細かいと、フェライト変態後の動の再結晶の開始ひずみが減少し、動の再結晶の kinetics が促進される。静的再結晶とは異なり、再結晶の駆動力が変形温度に依存することから、動の再結晶の kinetics が時間-温度図中で C 型の曲線を示すことを初めて見出している。得られた結果をもとに、UFF 組織を効率的に得るための新たな加工熱処理法を提案している。低温加工と中温保持・加工を組み合わせた新しい加工熱処理法によって、平均粒径 350nm～550nm の等軸 UFF 組織を得ることに成功している。得られた UFF 組織は、高い強度（引張強さ 810～973MPa）と大きな引張延性（全伸び 23～29%）を有することを、引張試験により明らかにしている。</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた成果を要約し、総括している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、低炭素鋼における動的フェライト変態挙動を基礎的に明らかにすることを目的として、Fe-10wt%Ni-0.1wt%C 合金に対して系統的な加工熱処理実験を行い、加工熱処理時の応力-ひずみ応答や、得られるミクロ組織を詳細に調査した研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. Fe-10Ni-0.1C 合金における動的フェライト変態の発現を二回微分法による変形抵抗解析によって明らかにした上で、温度、ひずみ速度、ひずみ量、加工前の等温保持時間といった加工熱処理条件が動的フェライト変態の kinetics とフェライト組織に与える影響を系統的に明らかにした。その結果、変形温度の低下とオーステナイト粒の微細化により、動的フェライト変態の発現ひずみが減少するとともに変態 kinetics が大きく促進されること、ひずみ速度の増加は変態 kinetics を加速するが、ひずみ速度が小さいほど動的変態開始の臨界ひずみは減少し、同じ加工度でより大きな体積率のフェライト組織が得られることを初めて見出した。

2. 動的変態と静的変態の類似点と相違点を明らかにした。静的フェライトがオーステナイト母結晶の粒界から生じる微細等軸粒と粒内から生じる粗大等軸粒からなる組織を示すのに対し、動的フェライトは等軸 UFF と伸長した粗大フェライト粒からなる組織を示すことを見出した。等軸 UFF は、動的変態によって生じたフェライトが、引き続く動的再結晶によって超微細化したものであることを初めて証明した。これは、超微細粒フェライト組織の形成機構を基礎的に解明することにより、将来の実用応用における加工熱処理の制御指針を示すものであって、重要な研究成果である。またさらに、動的変態と引き続く動的再結晶現象のひずみ速度依存性を系統的に明らかにした。

3. 上記の結論を受け、UFF 組織を効率的に得るための新たな加工熱処理法を提案し、低温加工と中温保持・加工を組み合わせた加工熱処理によって、平均粒径 350nm～550nm の等軸 UFF 組織を得ることに成功した。そして、得られた UFF 組織が高い強度（引張強さ 810～973MPa）と十分大きな引張延性（全伸び 23～29%）を有することを、引張試験により示した。これは、高い強度と大きな延性を両立した超微細粒低炭素鋼を巨大ひずみ加工を必要とせず得るための加工熱処理手法を初めて示したものであって、実用的に大きな発展性を有している。

以上の成果は、低炭素鋼における動的フェライト変態の詳細を初めて系統的に明らかにすることによって動的変態の基礎に関する知見を深め、将来的な鋼の組織制御の可能性を広げるものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 27 年 2 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表

氏 名	趙 立佳
-----	------

に際しては、（平成３２年２月２９日までの間）当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。